doi:10.13866/j.azr.2019.05.27

# 陕北六道沟流域切沟形态复杂性及其类型划分[①]

赵 影[1,2]， 董 爽[1,3]， 贾玉华[1]

（1. 沈阳农业大学水利学院,辽宁省水土流失防控与生态修复重点实验室,辽宁 沈阳 110866；
2. 中国科学院水土保持与生态环境研究中心黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室,陕西 杨凌 712100；
3. 铜仁职业技术学院,贵州 铜仁 554300）

**摘 要：** 黄土高原切沟对流域地貌和自然环境造成了深刻影响,研究切沟形态特征有助于揭示其发育过程和演化机理。在陕北六道沟小流域,利用手持 GPS 测量 32 条发育典型的切沟,通过研究取得以下结果：① 沟长大于 100 m 的切沟占调查总数的 81.2%。切沟横向扩张程度大于其下切程度,且宽度和深度自沟头和横断面到沟口显著增加($P<0.05$)；② 与形状指数相比,计盒维数对切沟分支和边缘破碎信息表达效果更佳；③ 根据切沟分支情况,其形态可分为线型、沟头扩展型、沟头分支型和沟底分支型 4 种类型。总之,从主沟和支沟的空间联系、支沟沟长占比和对切沟类型划分而言,支沟是重新认识切沟和流域破碎地貌不可忽视的重要组成部分。

**关键词：** 侵蚀沟；形态；分形维数；切沟类型；六道沟；黄土高原

黄土高原是沟蚀引发环境威胁与地貌演变的代表性区域[1-2]。在六盘山以东和吕梁山以西,沟谷密度由南向北方向可递增至 10 km·km$^{-2}$ 以上[3]。在黄土高原丘陵沟壑区,50% 以上的泥沙都来自于切沟侵蚀[4]。沟蚀在吞噬土地和大量产沙的同时,塑造了黄土高原地形破碎和沟谷密布的地表形态。自 1999 年退耕还林还草工程实施以来,黄土高原植被覆盖率显著提高[5-6],流域产流产沙量大幅下降[7],为切沟发育减缓创造了有利条件,也为调查切沟形态特征提供了有利时机。

切沟是黄土高原常见的一种沟谷形态,是坡面集中径流主导下纵向、横向和垂向三维空间侵蚀的结果[8]。不同的地貌条件和侵蚀应力组合会导致其规模不一,形态各异,因此不同学者对切沟的定义和分类也不尽相同。罗来兴先生将宽度和深度均 >50 cm 的侵蚀沟称为切沟[9]；杨华[10]认为切沟的宽度一般在 20 m 左右,长度不超过 100 m；朱显谟先生将不能横过耕作作为浅沟与切沟的区分标准[11]。小切沟常以栅状、放射状或者枝状发育在大切沟的谷缘上[12]；在切沟由小到大的发展过程中,其形态特征相应发生改变。以往研究通常将大切沟与小切沟割裂起来分别进行研究[10-12],实际上部分小切沟(即支沟)是在大切沟(即主沟)基础上发育而成。野外调查发现两种类型的切沟:沟头分支型和沟底分支型。在这两种类型中,大切沟与其分支之间相互连通。将连通的大切沟和小切沟即主沟和支沟看作一个整体,是研究切沟形成过程以及演变规律的内在要求和必然选择。

在切沟形态学方面,目前基于遥感影像和 DEM 自动识别、切沟形态分析和发育模型等方面已取得一定进展[13]。利用遥感影像研究切沟形态,不便于确定下切深度,且因判读主观性强和植被影响解译精度而具有较大误差,该方法适合于大尺度切沟形态特征的提取[3,14]。三维激光扫描技术在小尺度切沟形态演变及侵蚀量估算等方面[14-15]优势明显,如吴红艳等[16]利用该技术描述了高分辨率条件下切沟的形态特征,并建立了与低分辨率 DEM 提取的切沟宽度、表面积和体积的转换方程；李镇等[17]利用高精度 DEM 构建了晋西黄土区切沟体积的估算模型。然而该方法由于设备昂贵,目前应用仍相对较少。基于上述情况,本研究拟通过实地调查和测量手段对小流域尺度范围内切沟形态特征开展研究,在切沟沟头、横断面和沟口基本形态参数[18-20]描述基础上,揭示流域尺度切沟形态的复杂性,并尝试划

① 收稿日期：2018-12-18； 修订日期：2019-03-19
基金项目：国家自然科学基金项目(41571221)资助
作者简介：赵影(1993-),女,博士研究生,主要从事土壤侵蚀和同位素水文方面研究. E-mail：13898159705@163.com
通讯作者：贾玉华. E-mail：jiayuhua@163.com

分切沟类型,为深入理解黄土高原切沟侵蚀过程、治理和预防沟蚀提供参考依据。

## 1　试验与方法

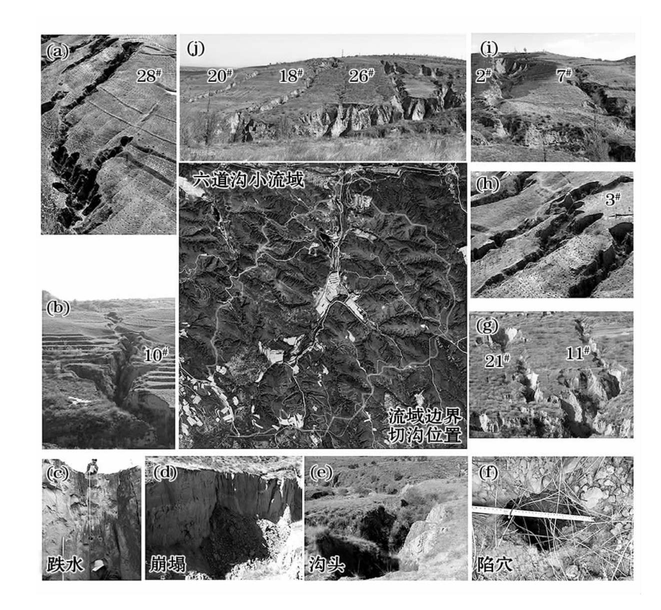
### 1.1　研究区概况

六道沟小流域(110°21′~110°23′E,38°46′~38°51′N)属于窟野河水系二级支流(图1),该流域地处黄土高原北部水蚀风蚀交错区,属于毛乌素沙地南缘和黄土丘陵区的过渡地带。流域面积7.09 $km^2$,海拔1 081.0~1 273.9 m。地貌特征为典型的盖沙黄土丘陵沟壑地貌。平均沟壑密度为7.4 km·$km^{-2}$,沟谷地约占流域总面积的38%。该区气候特征为中温带半干旱季风气候;年蒸发量785.4 mm,多年平均降水量为437.4 mm,70%以上的降水集中在6—9月;年平均气温8.4 ℃,≥10 ℃积温3 248 ℃,无霜期153 d。该区土壤类型主要有黄绵土、沙黄土、风沙土及坝地淤土,土壤剖面常含有形状不规则和大小不一的料姜石(碳酸盐结核)。土壤容重为1.26~1.65 g·$cm^{-3}$,土壤抗冲蚀性差。流域内自然植被破坏殆尽,现存森林资源全部以人工林为主。常见植物种有柠条(*Caragana korshinskii*)、沙柳(*Salix psammophila*)、长芒草(*Stipa bungeana*)、小叶杨(*Populus simonii*)、紫花苜蓿(*Medicago sativa*)、达乌里胡枝子(*Lespedeza davurica*)、茵陈蒿(*Artemisia capillaris*)和山杏(*Prunus armeniaca*)等[17]。

### 1.2　研究方法

参考朱显谟先生对黄土区土壤侵蚀分类的结果[11],本文所指切沟以不能横过耕作为主要特征。2016年4—5月中旬对流域内切沟进行实地调查与测量,具体方法为:利用手持GPS(Garmin GPSmap629sc)测定切沟沟缘和沟底转折处地理位置,平直处每隔1~2 m测量1次,转折处测点加密;利用激光测距仪(Nikon COOLSHOT20i)和钢卷尺在沟头、横断面变化明显处及沟口测量沟宽、沟深;利用坡度仪测定沟头坡度,并调查沟道内部陷穴[18]、跌水及崩塌等具体特征。

本研究累计调查32条典型切沟(图1),249个横断面。依据Oostwoud Wijdenes等[21]及李镇[22]的研究方法,将沟头上部汇水面积较大、有明显径流痕迹、沟头边缘锋利、张裂隙明显、沟头底部存在跌水潭等具体特征的沟头判定为活跃沟头,反之则视为




注:数字#为切沟编号。

图1　六道沟小流域及典型切沟实景照片

Fig. 1　Images of the Liudaogou minor drainage basin and some investigated gullies

不活跃沟头。选取用以描述切沟整体形态的指标有沟道长度、平均沟宽、平均沟深、宽深比、坡向、周长、面积、形状指数和计盒维数;沟头指标有沟头宽、沟头深、沟头坡度和沟头活跃性;沟口指标有沟口宽和沟口深。将手持GPS测得的数据导入ArcGIS中,利用该软件提取切沟的沟长、周长和面积等形态参数。从主沟沟头中心至沟口中心沿沟底中线画线,沟道勾绘偏差不超过5 m,曲线的长度即为主沟沟长;主沟沟长与各支沟沟长累加定义为切沟长度,以下称作沟长。利用沟缘线图层数据计算切沟周长,将线图层转化为面图层得到每条切沟的沟道面积。

### 1.3　计盒维数与形状指数

计盒维数是地貌形态分形特征量化的指标。其原理为:对于任一个平面分形体,当用一定尺度$\delta$的方格网去覆盖时,就会出现其中一些方格含有图形的一部分,而另一些方格却是空的情形。如果逐渐缩小方格的尺寸,那么包含图形的格网数目就会越来越大。设方格的边长为$r$,计数非空方格数为$N(r)$,对不同的$r$($r=1,2,3,\cdots,M$),则有$M$个不同的$N(r)$值与之对应,只要点绘$\ln N(r)$和$\ln(r)$的关系线,利用最小二乘法对$\ln N(r)$和$\ln(r)$作一元线性回归,找出其中直线部分(对应$r$的范围即为无标度区),其直线的斜率就认为是计盒维数$d$值。利用ArcGIS软件将切沟形状矢量数据转化为栅格结构,栅格大小依次取0.05 m×0.05 m、0.1 m×0.1

m、0.5 m×0.5 m、2 m×2 m、4 m×4 m、6 m×6 m、8 m×8 m、10 m×10 m,…,20 m×20 m 共 13 级网格梯度,$N(r)$个数在 1～100 000 之间变化。计盒维数计算式为[23-24]:

$$d = -\lim \frac{\ln N(r)}{\ln r}$$

利用形状指数对切沟形状复杂性进行描述,其计算公式为[25]:

$$S = \frac{0.25P}{\sqrt{A}}$$

式中:$S$ 为切沟形状指数;$P$ 为切沟周长;$A$ 为切沟面积。形状指数反映切沟形状的变化,$S$ 形状指数值越小,形状越规则和简单;$S$ 值越大,切沟形状越复杂。通常侵蚀沟的形状指数比田块与湖泊要大很多。

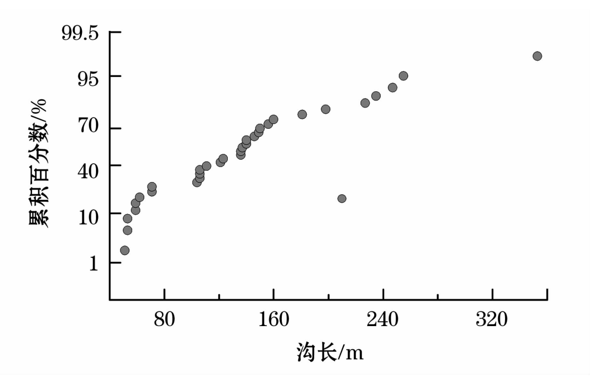
### 1.4 统计分析

利用 SPSS 20 对切沟沟头、横断面以及沟口处的宽度和深度分别进行单因素方差分析和 Duncan 多重比较。

## 2 结果与讨论

### 2.1 切沟基本形态

本研究区切沟沟长介于 51～353 m,平均沟长为 137.56 m,其中沟长小于 100 m、介于 100～200 m 和大于 200 m 的切沟分别占调查总数的 18.8%、65.6% 和 15.6%(图 2)。沟长是反映切沟形状大小最直观的参数之一,沟长发育通常受地貌起伏状况、降雨与径流特征、流域大小、沟头到流域边界的距离、沟道比降、土壤类型与性质以及植被特征等因素影响。已有结果显示,山西省吉县切沟的长度变化范围是 8～160 m[10];元谋干热河谷切沟沟长变化范围是 10.88～249.11 m,其中 4 条切沟沟长超过 150 m[26-27];东北黑土区处于发育初期的切沟沟长为 110 m 左右,处于稳定阶段的切沟长度达 530 m[18]。少数文献将沟长不超过 100 m 作为对切沟定义的内容[7],显然是不合适的,有研究者在切沟已有概念的基础上去除了对沟长约定的内容[13]。本研究使用主沟与支沟之和来代表切沟沟长,支沟沟长占主沟沟长的比例在 11%～198%,均值为 74%,可见支沟是切沟发育不可忽视的重要组成部分。

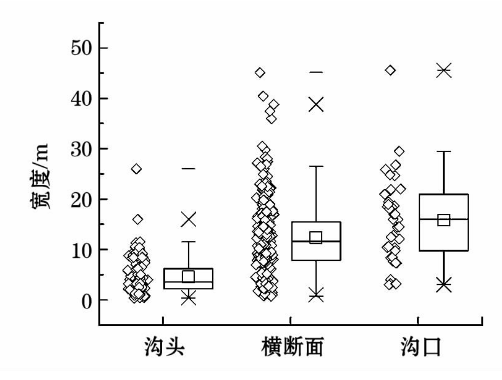



注:沟长均值为(137.56±69.66)m。

图 2 沟长累积概率曲线

Fig. 2 Cumulative frequency distribution of gully length

宽度和深度是切沟重要的形态特征,同一条切沟其沟头、横断面和沟口的宽度及深度差异较大(图 3)。研究区切沟沟头、横断面和沟口的宽度分别为:2.8～12.45 m、5.2～19.76 m 和 4.0～45.58 m,三者均值分别为 6.83 m、12.54 m 和 20.33 m。经方差分析和多重比较,两两之间在 $P<0.05$ 水平差异显著。研究区沟头、横断面和沟口深度分别是 1.30～7.50 m、2.15～15.20 m 和 1.70～23.00 m,均值分别为 3.79 m、7.46 m 和 12.03 m,两两之间亦差异显著($P<0.05$)。总体而言,沟口扩张和下



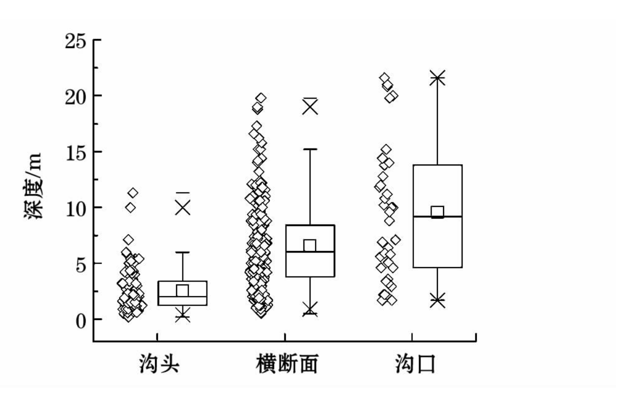



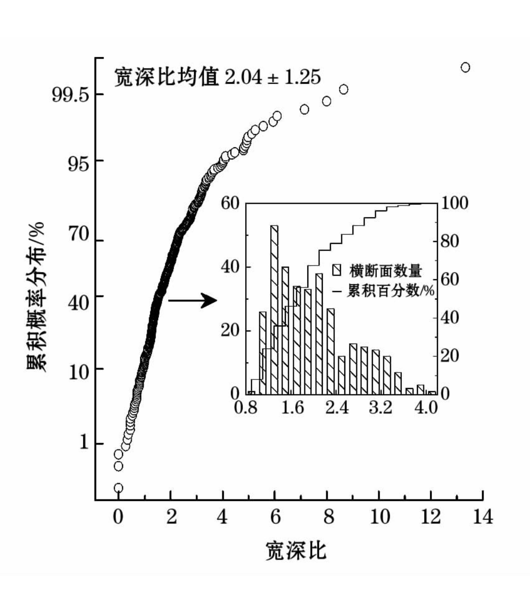

图 3 不同横断面切沟宽度和深度的统计特征

Fig. 3 Statistic results of gully width and depth along the cross-sections of head-cut, middle part and outlet of the investigated gullies

切侵蚀程度最大,横断面次之,沟头最小;切沟水平扩张程度大于其垂直下切程度,二者基本相差 2 倍以内。Hayas 等[28]在西班牙西南部观测到的切沟具有类似的特征和规模,该切沟最大宽度为 59.0 m,沟宽均值为 13.1 m,平均沟深为 5.0 m。上述沟头、横断面和沟口宽度与深度的结果显示,切沟通过割裂土地在流域中占据较大的空间尺度,切沟负地形的深刻发育对流域地貌而言造成了永久性的改变。

宽深比是反映切沟横断面形态更为直接的复合指标。宽深比小于 1,表明切沟为窄深型。本研究中切沟宽深比变化于 0.34 ~ 13.33 之间,均值为 2.04 ± 1.25(图 4);宽深比范围介于 1 ~ 4 的横断面占调查总数的 81.3%,其中宽深比为 1 ~ 2、2 ~ 3 和 3 ~ 4 的横断面分别占 56%、32% 和 12%。一般而言,切沟由浅沟发育而来,切沟横断面先后可出现 V→U→宽 U 等形状变化。本研究中,切沟横断面扩张程度高于其下切深度,与长时间切沟横断面冲淘、崩塌和泄溜等侵蚀过程具有紧密关系。此外,沟头宽深比变异系数最大(0.79),横断面宽深比变异系数低于沟口(0.50 vs 0.63),说明沟头形态变异程度最大。Deng 等[27]对云南干热河谷切沟研究得出的相应沟头、横断面和沟口宽深比均值分别为 3.95、3.08 和 2.96;Songu 等[29]观测到尼日利亚 Demepke 流域一条长为 220 m 的切沟沟头宽深比为 8.18,该切沟宽深比均值为 4.73,平均沟深为 1.27 m。上述结果与沟头是切沟最活跃部位的观点一致。

研究区切沟断面宽与断面深具有显著的线性关系($P<0.01$),沟宽能够解释沟深 59% 的变异(图 4)。根据杨华[10]的测量数据,此处拟合了晋西蔡家川流域切沟沟宽和沟深的线性方程:$y = 5.28 + 0.37x$($R^2 = 0.32$, $P < 0.01$, $N = 49$)。两个方程的斜率接近(0.43 vs 0.37),两个拟合结果均可说明,在切沟发育过程中其宽度的变化快于深度。



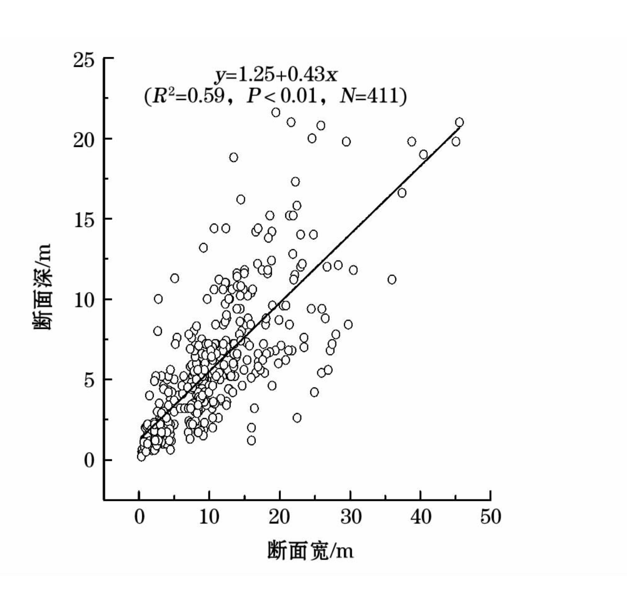



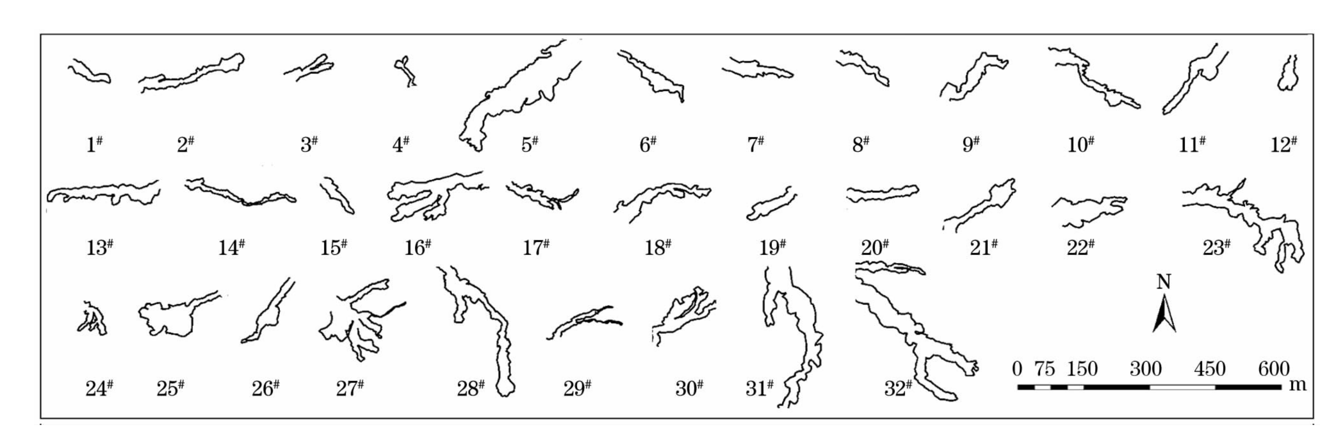

图 4　切沟沟头、横断面和沟口宽度与深度的统计关系

Fig. 4　The cumulative frequency of width/depth ratio and the linear relation between width and depth along gully cross-sections

## 2.2　切沟形状复杂性

借助计盒维数可对切沟局部与整体所具有的统计自相似性进行定量描述。研究区切沟计盒维数变化于 1.011 ~ 1.293 之间,均值为 1.119,该值介于张莉等[30]及 Sidorchuk[31]的数值结果之间。张莉等[30]在大尺度上研究得出神木县地貌计盒维数为 1.493 4,Sidorchuk[31]通过数值模拟计算的是切沟底部的计盒维数。按计盒维数由小到大对切沟图像进行排序(图 5),结果发现,随着计盒维数的增大,切沟的形状由简单趋向于多个支沟并存的复合形状,相应的破碎化程度逐渐加强。计盒维数在 1.011 ~ 1.112,尽管切沟朝向各异,但沟形相似,且分支不明显;计盒维数在 1.113 ~ 1.293,切沟分支程度有所加强,大多数切沟出现了明显的分支。整体而言,较高的计盒维数对应分支和边缘破碎更加明显的切沟。

形状指数在景观生态学中用以描述斑块形状与以正方形为参照形状相比的破碎程度。六道沟流域切沟形状指数为 12.23 ~ 35.10,均值为 20.58。王瑞[32]得出1996年胶东半岛丘陵区大沽夹河流域冲




注:按计盒维数由小到大排序。下同。

图 5　六道沟流域 32 条切沟的形状序列

Fig. 5　Shapes of 32 gullies in the Liudaogou minor drainage basin

沟的形状指数为 27.35,且受人为活动干扰其数值发生变化,2010 年降为 23.26。从数值大小判断,本研究得出的形状指数结果是可以接受的。此外,2#与 32#切沟的形状指数接近(26.47 vs 26.14),但其分支情况差异较大;7#切沟无分支,但其形状指数高达 30.42。这说明形状指数大小对切沟分支信息的代表性差。

图 5 显示,按照计盒维数由小到大排序后,切沟的形状表现出了一定的连续性和过渡性。计盒维数随切沟序列呈显著的线性关系(图 6),截距为 1.000,斜率为 0.007,表明切沟的形状是在 1 维的基础上微弱发生变化。同样的,切沟序列对其形状指数进行线性拟合,其拟合效果($R^2$ = 0.32)低于计盒维数的拟合效果($R^2$ = 0.96)。与此同时,对 32 条切沟按照形状指数由小到大排序,其线性拟合效果则好于计盒维数。然而按照形状指数排序,在视觉上则沟形杂乱无序,未能观察到切沟分支和破碎的过渡特征。因此,形状指数在表征切沟的具体分支信息和边缘破碎程度方面的效果逊色于计盒维数。

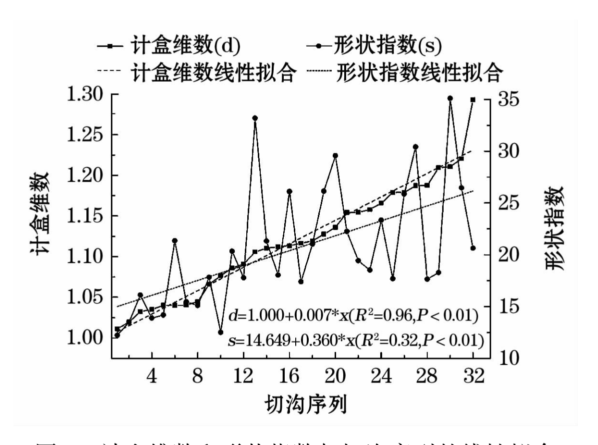



图 6　计盒维数和形状指数与切沟序列的线性拟合

Fig. 6　Linear fitted relationship between box dimension/shape index and gullies

## 2.3　切沟类型

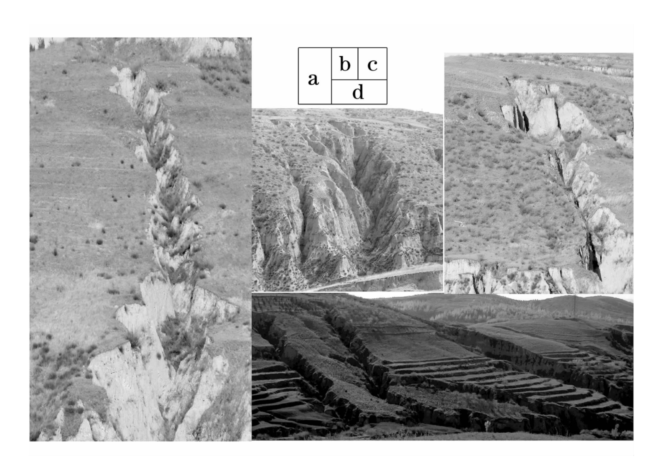
本研究共调查 32 条切沟,其外表形态尤其是形状差异较大(图 5)。依据分支状况划分为 4 种类型:

2.3.1　线型　包括直线形和曲线形,其中曲线形沟道最为常见。其主要特征为沟形狭长,无分支,沟头活跃、坡度较大且有跌水,沟道上部多串珠状陷穴,促进沟头前进。受植被或地形因素影响,沟道上部多有转折且转折处常出现跌水,其中活跃沟头占该类型沟头总数的 69%。沟头朝向与沟道走向不一致。线型切沟是 4 种类型中最简单的一种切沟类型,占调查总数的 50%。

2.3.2　沟头扩展型　沟头接近分水岭且多处于不活跃状态,活跃沟头占该类型沟头总数的 33%;沟身狭窄,沟道中上部扩张严重,4 种类型中其平均沟头坡度和平均沟道宽深比最大,线型切沟和沟头扩展型切沟的周长相差不大。

2.3.3　沟头分支型　沟道中上部由 2 条或 2 条以上支沟汇合而成,各支沟发育程度不同,与凹形地形有着密切关系;其沟头坡度最小,溯源侵蚀最轻微。其中活跃沟头占该类型沟头总数的 44%。沟道底部陷穴多集中在中上游,呈椭圆形,规模较小。4 种类型切沟中其平均沟道周长和平均沟道面积最大,但横向扩张和纵向下切较轻微。

2.3.4　沟底分支型　沟头多呈心形或辐射状,沟头壁倾斜,该类型切沟中,75% 为不活跃沟头,基本已接近分水岭。沟底有多株乔木生长;沟底陷穴少见。




注:(a)线型 20#;(b)沟头分支型 1#;(c)沟头扩展型 21#;(d)沟底分支型 13#。

图 7　六道沟流域典型切沟

Fig. 7　Typical gullies in the Liudaogou minor drainage basin

沟道下部有支沟汇流,汇流后沟道变宽,而且横向扩张和纵向下切都最严重。平均沟道长度、平均沟道宽度、平均沟道深度最大,侵蚀规模最大。沟底分支型切沟各形态参数的变化程度较小(图 7)。

通过将连通的大切沟和小切沟视为一个整体进行切沟类型划分,便于分析其形状变化对切沟发育的影响以及主沟和支沟之间的相互促进作用,对于切沟侵蚀机理的认识以及根据因害设防进行治理具有一定的意义。

## 3　结 论

(1) 切沟沟长介于 51 ~ 353 m,其中沟长大于 100 m 的切沟占调查总数的 81.2%;对于横断面宽度和深度,均表现为沟头 < 横断面 < 沟口,且两两之间差异显著;宽深比介于 1 ~ 4 的横断面占调查总数的 81.3%。

(2) 切沟的计盒维数介于 1.011 ~ 1.293,较高的计盒维数对应分支和边缘破碎更加明显的切沟;与形状指数相比,计盒维数更适合表达切沟的形状复杂性。

(3) 根据分支情况,切沟形态可分为线型、沟头扩展型、沟头分支型和沟底分支型 4 种类型;线型切沟是最简单且常见的类型,占调查总数的 50%。从主沟和支沟的空间联系、支沟沟长占比和对切沟类型划分而言,支沟是重新认识切沟和流域破碎地貌不可忽视的重要组成部分。

致谢:感谢野外调查时李同川、金珊、刘博和李春辉等同学提供的帮助。

**参考文献(References):**


[1] 鞠忻倪,贾玉华,甘淼,等. 黄土沟壑区不同地形部位土壤大孔隙特征研究[J]. 土壤学报,2018,55(5):1 098 - 1 107. [Ju Xinni,Jia Yuhua,Gan Miao,et al. Characteristics of soil macropores in the gully area of Loess Plateau as affected by terrain[J]. Acta Pedologica Sinica,2018,55(5):1 098 - 1 107.]

[2] 甘淼,贾玉华,李同川,等. 黄土区坡沟系统容重、饱和导水率和土壤含水量变化分析[J]. 干旱区研究,2018,35(2):315 - 324. [Gan Miao,Jia Yuhua,Li Tongchuan,et al. Variation of soil bulk density,saturated hydraulic conductivity and soil moisture content in a slope-gully unit on the northern Loess Plateau[J]. Arid Zone Research,2018,35(2):315 - 324.]

[3] 田剑,汤国安,周毅,等. 黄土高原沟谷密度空间分异特征研究[J]. 地理科学,2013,33(5):622 - 628. [Tian Jian,Tang Guo'an,Zhou Yi,et al. Spatial variation of gully density in the Loess Plateau[J]. Scientia Geographica Sinica,2013,33(5):622 - 628.]

[4] 郑粉莉,徐锡蒙,覃超. 沟蚀过程研究进展[J]. 农业机械学报,2016,47(8):48 - 59. [Zheng Fenli,Xu Ximeng,Qin Chao. A review of gully erosion process research[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2016,47(8):48 - 59.]

[5] Chen Y P,Wang K,Lin Y,et al. Balancing green and grain trade[J]. Nature Geoscience,2015,8(10):739 - 742.

[6] 罗娅,杨胜天,刘晓燕,等. 黄土高原次降雨径流产沙变化及其与雨强和植被盖度变化的相关性[J]. 干旱区研究,2015,32(4):698 - 709. [Luo Ya,Yang Shentian,Liu Xiaoyan,et al. Changes in enent-based rainfall-runoff-sediment and the relationships between these changes and rainfall intensity and vegetation coverage variations in Loess Plateau of China[J]. Arid Zone Research,2015,32(4):698 - 709.]

[7] Fu B,Wan F S,Liu Y,et al. Hydrogeomorphic ecosystem responses to natural and anthropogenic changes in the Loess Plateau of China[J]. Annual Review of Earth and Planetary Sciences,2016,45(1):223 - 243.

[8] Gan M,Jia Y,Shao M,et al. Permanent gully increases the heterogeneity of soil water retention capacity across a slope-gully system[J]. Agriculture,Ecosystems & Environment,2019,272:206 - 217.

[9] 罗来兴. 划分晋西、陕北、陇东黄土区域沟间地与沟谷的地貌类型[J]. 地理学报,1956,29(3):201 - 222. [Luo Laixing. A tentative classification of landforms in the Loess Plateau[J]. Acta Geographica Sinica,1956,29(3):201 - 222.]

[10] 杨华. 山西吉县黄土区切沟分类的研究[J]. 北京林业大学学报,2001,23(1):38 - 43. [Yang Hua. Classification and control of gully in Loess region of Jiaxian County,Shanxi Province[J]. Journal of Beijing Forestry University,2001,23(1):38 - 43.]

[11] 朱显谟. 黄土区土壤侵蚀的分类[J]. 土壤学报,1956,4(2):99 - 115. [Zhu Xianmo. Classification on the soil erosion in the Loess

Plateau［J］. Acta Pedologica Sinica,1956,4(2):99 – 115.］

［12］陈一先,焦菊英,魏艳红,等. 陕北黄土区退耕前(1976 – 1997)坡面切沟发育特征［J］. 农业工程学报,2017,33(17):120 – 127.［Chen Yixian,Jiao Juying,Wei Yanhong,et al. Characteristics of gully development in northern Shaanxi Hilly Loess region before Grain-for-Green programme(1976 – 1997)［J］. Transactions of the Chonese Society of Agricultural Engineering,2017,33(17):120 – 127.］

［13］那嘉明,杨昕,李敏,等. 黄土高原切沟地貌学研究述评［J］. 地理与地理信息科学,2016,32(4):68 – 75.［Na Jiaming,Yang Xin,Li Min,et al. Progress in geomorphology research on young gully in Loess Plateau［J］. Geography and Geo-Information Science,2016,32(4):68 – 75.］

［14］张文杰,程维明,李宝林,等. 黄土高原丘陵沟壑区切沟侵蚀与地形关系分析——以纸坊沟流域为例［J］. 地球信息科学学报,2014,16(1):87 – 94.［Zhang Wenjie,Chen Weiming,Li Baolin,et al. The relationship between gully erosion and geomorphological factors in the hill and ravine of the Loess Plateau［J］. Journal of Geo-Information Science,2014,16(1):87 – 94.］

［15］马鼎,李斌兵. 黄土沟壑区切沟植被的激光点云滤波及地形构建［J］. 农业工程学报,2013,29(15):162 – 171.［Ma Ding,Li Binbing. Vegetation feltering in gully region of Loess Plateau based on laser scanning point cloud's intensity attenuation model and its terrain construct［J］. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering,2013,29(15):162 – 171.］

［16］吴红艳,郑粉莉,徐锡蒙,等. 不同分辨率 DEM 提取切沟形态特征参数的转化研究［J］. 水土保持学报,2016,30(6):147 – 152.［Wu Hongyan,Zheng Fenli,Xu Ximeng,et al. Transformation of gully morphological characteristic indecators extracted from DEM of different resolution［J］. Journal of Soil and Water Conservation,2016,30(6):147 – 152.］

［17］李镇,张岩,尚国琲,等. 晋西黄土区切沟断面特征及体积估算模型［J］. 农业工程学报,2018,34(6):152 – 159.［Li Zhen,Zhang Yan,Shang Guofei,et al. Characterizing gully cross section and modelling gully volume in Hilly Loess region of Western Shanxi Province［J］. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering,2018,34(6):152 – 159.］

［18］胡刚,伍永秋,刘宝元,等. 东北漫岗黑土区切沟侵蚀发育特征［J］. 地理学报,2007,62(11):1 165 – 1 173.［Hu Gang,Wu Yongqiu,Liu Baoyuan,et al. The growth characteristics of gully erosion over rolling hilly black soil area of Northeast China［J］. Acta Geographica Sinica,2007,62(11):1 165 – 1 173.］

［19］Jia Y,Li T,Shao M,et al. Disentangling the formation and evolvement mechanism of plants-induced dried soil layers on China's Loess Plateau［J］. Agricultural and Forest Meteorology,2019,269 – 270:57 – 70.

［20］金珊,贾玉华,郭成久,等. 陕北黄土区切沟内陷穴发育特征研究［J］. 土壤通报,2017,48(4):948 – 954.［Jin Shan,Jia Yuhua,Guo Chengjiu,et al. Development characteristics of sink holes in gullies on the Northern Loess Plateau［J］. Chinese Journal of Soil Science,2017,48(4):948 – 954.］

［21］Oostwoud Wijdenes D J,Poesen J,Vandekerckhove L,et al. Spatial distribution of gully head activity and sediment supply along an ephemeral channel in a Mediterranean environment［J］. Catena,2000,39(3):147 – 167.

［22］李镇. 黄土高原切沟发育监测方法与侵蚀模型研究［D］. 北京:北京林业大学,2015.［Li Zhen. Study on Monitoring and Modelling Gully Erosion on the Chinese Loess Plateau［D］. Beijing:Beijing Forestry University,2015.］

［23］杨玉荣. 基于分形理论的地貌表达［J］. 武汉测绘科技大学学报,1996,21(2):154 – 158.［Yang Yurong. Fractal-based expression of landform［J］. Journal of Wuhan Technical University of Surveying and Mapping,1996,21(2):154 – 158.］

［24］王小丹,钟祥浩,范建容,等. 金沙江干热河谷元谋盆地冲沟沟头形态学特征研究［J］. 地理科学,2005,25(1):63 – 67.［Wang Xiaodan,Zhong Xianghao,Fan Jianrong,et al. Study on the morphological characteristics of the gully heads in Yuanmou basin,arid river valley of Jinsha river,China［J］. Scientia Geographica Sinica,2005,25(1):63 – 67.］

［25］王小军,张强,古璇清. 基于分形理论的灌溉水有效利用系数空间尺度变异［J］. 地理学报,2012,67(9):1 201 – 1 212.［Wang Xiaojun,Zhang Qiang,Gu Xuanqing. Fractal-based effecive utilization coefficient of irrigatation［J］. Acta Geographica Sinica,2012,67(9):1 201 – 1 212.］

［26］Deng Q,Miao F,Zhang B,et al. Planar morphology and controlling factors of the gullies in the Yuanmou dry-hot valley based on field investigation［J］. Journal of Arid Land,2015,7(6):778 – 793.

［27］Deng Q,Qin F,Zhang B,et al. Characterizing the morphology of gully cross-sections based on PCA:A case of Yuanmou dry-hot valley［J］. Geomorphology,2015,228:703 – 713.

［28］Hayas A,Vanwalleghem T,Laguna A,et al. Reconstructing long-term gully dynamics in Mediterranean agricultural areas［J］. Hydrology and Earth System Sciences,2017,21(1):235 – 249.

［29］Songu G A,Oyatayo K T,Iorkua S A. Impact of gully erosion stream sedimentation in Demepke drainage basin［J］. American Journal of Water Resources,2015,3(4):100 – 108.

［30］张莉,孙虎. 黄土高原典型地貌区地貌分形特征与土壤侵蚀关系［J］. 陕西师范大学学报(自然科学版),2010,38(3):76 – 79.［Zhang Li,Sun Hu. Study on the relationship between terrain fractal feature and potential soil erosion in typical morphologic region of Loess Plateau［J］. Journal of Shaanxi Normal University (Natural Science Edition),2010,38(3):76 – 79.］

［31］Sidorchuk A. Stages in gully evolution and self-organized criticality［J］. Earth Surface Processes and Landforms,2006,31(11):1 329 – 1 344.

［32］王瑞. 胶东半岛丘陵区景观格局变化对冲沟侵蚀的响应研究［D］. 烟台:鲁东大学,2014.［Wang Rui. The Response Research of Landscape Pattern Change and the Gully Erosion in Jiaodong Peninsula Hilly［D］. Yantai:Ludong University,2014.］

# Morphological Complex and Classification of Gullies in the Liudaogou Minor Drainage Basin in North Shaanxi Province

ZHAO Ying[1,2], DONG Shuang[1,3], JIA Yu-hua[1]

(1. *Liaoning Province Key Laboratory of Soil Erosion Control and Ecological Restoration*, *Shenyang Agricultural University*, *Shenyang* 110866, *Liaoning*, *China*;

2. *State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on the Loess Plateau*, *Institute of Soil and Water Conservation*, *Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources*, *Yangling* 712100, *Shaanxi*, *China*;

3. *Tongren Polytechnic College*, *Tongren* 554300, *Guizhou*, *China*)

**Abstract**: The appearance and development of permanent gullies considerably change the catchment geomorphology and natural environment in the Loess Plateau. Research on gully morphology is beneficial to understand the development process and evolvement mechanism of gullies. Through a field survey in 32 typical gullies in the Liudaogou minor drainage basin with portable GPS, the morphological characteristics and the main results are as follows: ① The number of gully >100 m in length accounted for 81.2%. The widening extent of the gullies was larger than their deepening. Specifically, the width of the gullies was two times higher than their depth. Moreover, the mean width and depth were significantly different among the head-cut, cross-section and outlet of the gullies; ② Inconsistent information was achieved from the box dimension and the shape index. In comparison, the box dimension was sufficient in expressing the shape complex of gullies, which ranged from 1.011 to 1.293 in this study; ③ According to the incorporated gully branch information, the permanent gullies were divided into four types: linear, head-expanded, head-branched and outlet-branched. In view of the spatial links between the main and branched gullies, the branches of the permanent gullies would be important for recognizing the gullies and understanding the fragmentation of the drainage basins.

**Key words**: erosional gully; geomorphology; fractal dimension; gully type; Liudaogou minor drainage basin; Loess Plateau